

---

---

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СУДОВОЖДЕНИЯ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СУДОВ

---

---

УДК 533.62.01

**Б.И. Руднев, О.В. Повалихина**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

## МЕТОД ОСАДИТЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОТБОРА ЧАСТИЦ САЖИ ИЗ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

*Рассмотрен метод осадительной поверхности для взятия проб частиц сажи из пламени углеводородных топлив. Приведен расчет основных характеристик устройства для отбора частиц сажи из камеры сгорания судового дизеля 6ЧН 24/36, реализующий указанный метод, представлены некоторые результаты обработки проб частиц сажи на электронном микроскопе S 5500 Hitachi (Япония).*

**Ключевые слова:** частицы сажи, проба, осадительная поверхность, камера сгорания, судовой дизель, электронный микроскоп.

**B.I. Rudnev, O.V. Povalikhina**

## METHOD PRECIPITATELY OF SURFACE AND DEVICE FOR SELECTION PARTICLES OF SOOT FROM MARINE DIESEL COMBUSTION CHAMBER

*Method precipitately of surface for selection tests particles of soot from flame hydrocarbon of fuels is given. Calculation basic of data device for selection particles of soot from marine diesel combustion chamber 6 ChN 24/36 have this method is shown. Some results of adaptation tests particles of soot on electronic microscope S 5500 Hitachi (Japan) is given.*

**Key words:** particles of soot, test, precipitately surface, combustion chamber, marine diesel, electronic microscope.

### Введение

Использование хорошо развитых в теплофизике зональных методов расчета теплообмена излучением [1, 2, 3] применительно к камере сгорания судовых дизелей в значительной степени ограничивается отсутствием довольно большого количества «входных» параметров (параметров, которые являются исходными для расчета процесса теплообмена излучением), позволяющих получать достоверные расчетные результаты. Так, например, при фундаментальной постановке задачи теплообмена излучением к входным параметрам относятся две группы величин, определяющих энергетическую часть: температура излучателя (пламени), степень черноты пламени и температура поверхностных зон и оптико-геометрическую часть: локальные геометрические и обобщенные угловые коэффициенты излучения. Количественное определение названных величин требует, как правило, проведения экспериментальных исследований на работающих судовых дизелях. В настоящей статье авторами предлагается использовать метод осадительной поверхности для отбора частиц сажи из камеры сгорания судового дизеля 6 ЧН 24/36 с помощью разработанного для этой цели устройства. Последующая обработка отобранных проб частиц сажи на ска-

нирующем электронном микроскопе с повышенной разрешающей способностью S 5500 Hitachi (Япония) позволило определить как средний диаметр частиц сажи, так и распределение их по размерам.

### Расчет основных характеристик устройства для отбора частиц сажи из камеры сгорания судового дизеля

Для реализации метода осадительной поверхности [4] применительно к камере сгорания судового дизельного двигателя авторами было разработано специальное устройство, представляющее собой сопло определенных размеров. Рабочая часть сопла рассчитывалась по рекомендациям [5]. Расчетная схема рабочей части сопла устройства для отбора проб сажи из камеры сгорания судового дизельного двигателя показана на рис. 1.

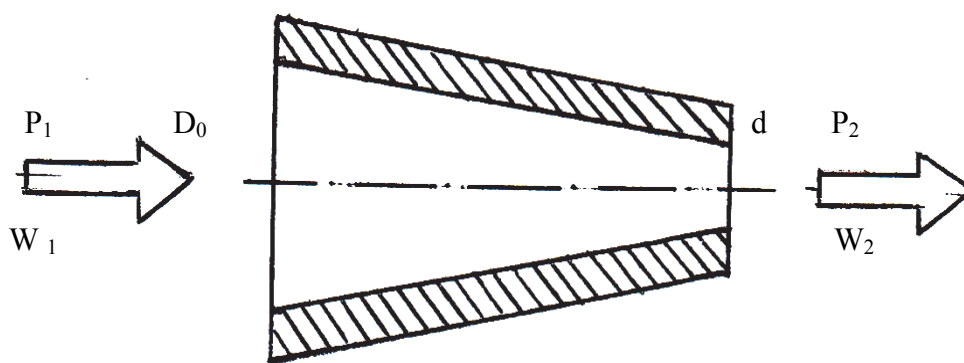


Рис. 1. Расчетная схема рабочей части сопла устройства для отбора проб сажи  
Fig. 1. Calculation scheme of operational segment of nozzle for selection particles of soot

Исходные параметры для расчета рабочей части сопла имели следующие значения:

- давление рабочего тела на входе в сопло  $P_1 = 150 \text{ кгс/см}^2 \approx 15 \text{ МПа}$  (эта величина примерно равна максимальному давлению сгорания  $P_{\max}$  в современных судовых мало- и среднеоборотных дизельных двигателях);

- давление рабочего тела на выходе из сопла  $P_2$  задается из соображений безопасной реализации метода осадительной поверхности применительно к условиям камеры сгорания судового дизельного двигателя:  $P_2 = 1,5 \text{ кгс/см}^2 \approx 0,15 \text{ МПа}$ ;

- коэффициент сопла  $\beta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{0,15}{15} = 0,01$ ;

- скорость рабочего тела на входе в сопло  $w_1 \approx 35 \text{ м/с}$  задается по экспериментальным данным, приведенным в [6, 7, 8];

- диаметр входного отверстия сопла,  $D_0 = 8 \text{ мм} = 0,008 \text{ м}$ , определяется конструкцией патрубка для индицирования дизельного двигателя и является стандартизированной величиной;

- диаметр выходного отверстия сопла  $d$  определяется в результате расчета.

Суть расчета рабочей части сопла устройства для отбора проб сажи из камеры сгорания сводится к следующему. Хорошо известно, что при течении газа через сопло поток ускоряется, при этом происходит перераспределение энергии потока: выходная скорость возрастает  $w_2 > w_1$ , а давление газа на выходе из сопла уменьшается  $P_2 < P_1$ . Поскольку коэффициент сопла  $\beta$  в нашем случае имеет весьма малое значение (0,01), то следует ожидать, что выходная скорость потока  $w_2$  будет близка к максимально возможной [9].

Оценим величину скорости звука применительно к условиям камеры сгорания дизельного двигателя средней форсировки по параметрам рабочего процесса. Максимальную температуру газа в камере сгорания  $T_{\max}$  принимаем равной 1800 К [7].

$$a_{зв} = \sqrt{kRT_{\max}} = \sqrt{1,4 \cdot 287 \cdot 1800} = 850 \text{ м/с}, \quad (1)$$

где  $k$  – показатель адиабаты, равный 1,4;  $R$  – газовая постоянная для воздуха, равная 287 Дж/(кмоль К).

Расчет по параметрам воздуха вместо параметров выхлопных газов дает погрешность менее 3 %, и ею пренебрегаем [7]. Из газовой динамики также известно [8], что при истечении газа через сопло ни при каких условиях выходная скорость  $w_2$  не может превышать скорость звука. Для нашего случая максимальная скорость на выходе из сопла может быть найдена по зависимости (2) [5]:

$$w_{\max} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_{\max}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4+1} \cdot 287 \cdot 1800} = 776,3 \text{ м/с}. \quad (2)$$

Таким образом, условие  $w_{\max} < a_{зв}$  выполняется, и это позволяет определить исходный диаметр выходного сечения сопла по уравнению неразрывности потока (закону сохранения массы) в виде

$$w_1 S_1 = w_2 S_2, \quad (3)$$

где  $w_1, w_2$  – входная и выходная скорости потока газа в сопле, в нашем случае  $w_2 = w_{\max}$ , м/с;  $S_1, S_2$  – площадь входного и выходного сечения сопла соответственно, м<sup>2</sup>.

Учитывая, что  $S_1 = \frac{\pi D_0^2}{4}$  и  $S_2 = \frac{\pi d^2}{4}$ , из (3) получаем  $w_1 \frac{\pi D_0^2}{4} = w_2 \frac{\pi d^2}{4}$  или с учетом преобразований

$$w_1 D_0^2 = w_2 d^2, \quad (4)$$

из (4) следует, что

$$d = \sqrt{\frac{w_1 D_0^2}{w_2}} = D_0 \sqrt{\frac{w_1}{w_2}} = 0,008 \sqrt{\frac{35}{776,3}} = 0,0017 \text{ м} = 1,7 \text{ мм}. \quad (5)$$

Длину рабочей части сопла  $\ell$  определяем по рекомендациям работы [1]:

$$\ell \approx 3(D_0 - d) = 3(0,008 - 0,0017) = 0,0189 \text{ м} \approx 0,019 \text{ м} \approx 19 \text{ мм}. \quad (6)$$

Таким образом, все параметры рабочей части сопла для устройства по отбору проб сажи из камеры сгорания определены.

Общий вид этого устройства и его детали представлены на рис. 2 и 3. Устройство изготовлено из стали 45. На рис. 4 показан общий вид стеклянных пластинок для осаждения частиц сажи, используемых в эксперименте.



Рис. 2. Общий вид устройства для отбора частиц сажи из камеры сгорания судового дизеля 6ЧН 24/36  
Fig. 2. General complexion of device for selection particles of soot from marine diesel combustion chamber 6 ChN 24/36

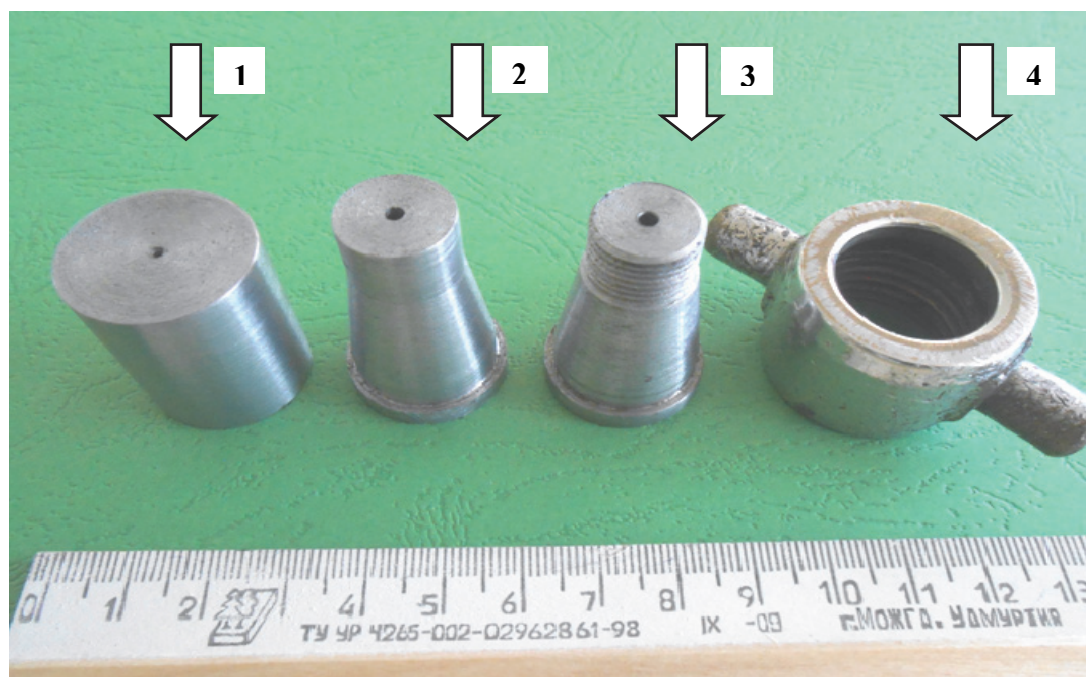


Рис. 3. Детали устройства для отбора проб частиц сажи из камеры сгорания судового дизеля 6ЧН 24/36: 1 – цилиндрическая насадка с отверстием диаметром 1 мм; 2 и 3 – сопла (основное и запасное) с входным диаметром 8 мм и выходным диаметром 1,7 мм; 4 – накидная гайка для крепления устройства на индикаторный канал дизеля  
Fig. 3. Details of device for selection particles of soot from marine diesel engine combustion chamber 6 ChN 24/36: 1 – cylindrical detail with hole of diameter 1 mm; 2 u 3 – nozzles (basic and duplicate) with input of diameter 8 mm and exital of diameter 1,7 mm; 4 – scale nut for crape device on indicator of diesel

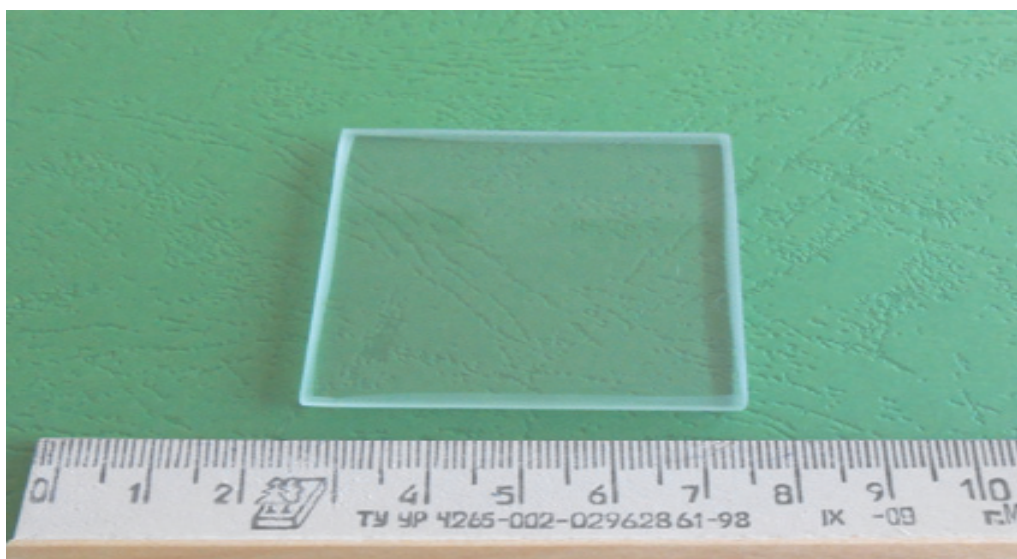


Рис. 4. Общий вид стеклянных пластинок для осаждения частиц сажи  
Fig. 4. General complexion glass of slabs for beset particles of soot

Разработанное и представленное авторами настоящей статье устройство для отбора частиц сажи из камеры сгорания судового дизельного двигателя устанавливается на специальном тракте, принципиальная схема которого показана на рис. 5.

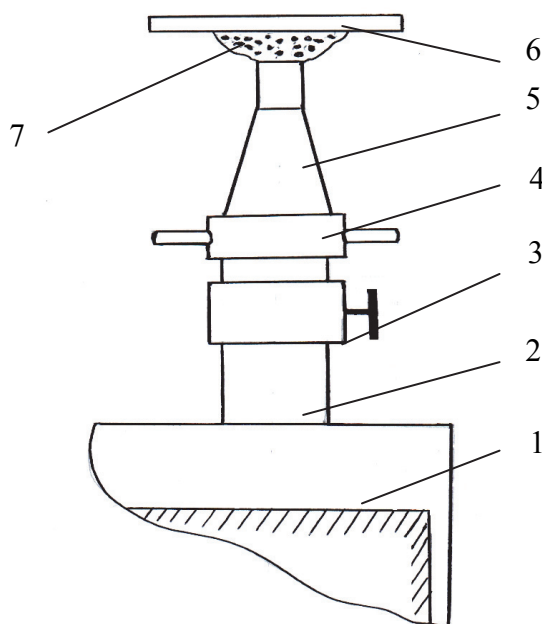


Рис. 5. Принципиальная схема тракта для отбора частиц сажи из камеры сгорания судового дизельного двигателя: 1 – камера сгорания; 2 – индикаторный канал; 3 – индикаторный кран; 4 – накидная гайка устройства для отбора частиц сажи; 5 – устройство для отбора частиц сажи; 6 – осадительная поверхность; 7 – поток газа из камеры сгорания

Fig. 5. Principial scheme of canal for selection particles of soot from marine diesel combustion chamber: 1 – combustion chamber; 2 – indicator canal; 3 – indicator tap; 4 – scale nut of device for selection particles of soot; 5 – device for selection particles of soot; 6 – beset surface; 7 – flow of gas from combustion chamber

Большинство судовых дизельных двигателей оборудовано индикаторными каналами для снятия индикаторных диаграмм или максимальных давлений сгорания и сжатия («гребенки» давления). Это облегчает доступ в камеру сгорания и позволяет использовать индикаторный канал как тракт для отбора частиц сажи.

После того как устройство смонтировано на дизельном двигателе (это осуществляется с помощью накидной гайки 4), непосредственно методика отбора частиц сажи сводится к следующему.

1. Дизельный двигатель запускается и прогревается (контроль осуществляется по температурам охлаждающей воды и смазочного масла) до рабочего состояния, при этом индикаторный кран 3 (см. рис. 5) закрыт.

2. Отбор проб частиц сажи производится при работе дизельного двигателя по стандартной нагрузочной характеристике (от холостого хода до 100 % нагрузки). На каждой «точке» нагрузочной характеристики дизельного двигателя отбор частиц сажи на осадительную поверхность (стеклянную пластинку) производится не менее 5 раз, при этом время открытия индикаторного крана составляет 2–3 с, что соответствует примерно отбору частиц сажи за 10–15 рабочих циклов для четырехтактного судового дизельного двигателя с частотой вращения коленчатого вала  $600 \text{ мин}^{-1}$ .

3. Стеклопластиковые пластинки с осевшими на них частицами сажи помещаются в специальные (заранее пронумерованные до эксперимента) коробки и далее используются для определения оптических характеристик частиц сажи с помощью сканирующего электронного микроскопа с высокой разрешающей способностью S 5500 Hitachi (Япония) [1, 11, 12].

#### Результаты исследования проб частиц сажи, полученные с помощью разработанного устройства

На рис. 6, 7 и 8 представлены в качестве примера некоторые результаты обработки проб частиц сажи на указанном выше сканирующем электронном микроскопе при работе судового дизеля 6 ЧН 24/36 с нагрузкой 25 % от  $Ne_{\text{ном}}$ .

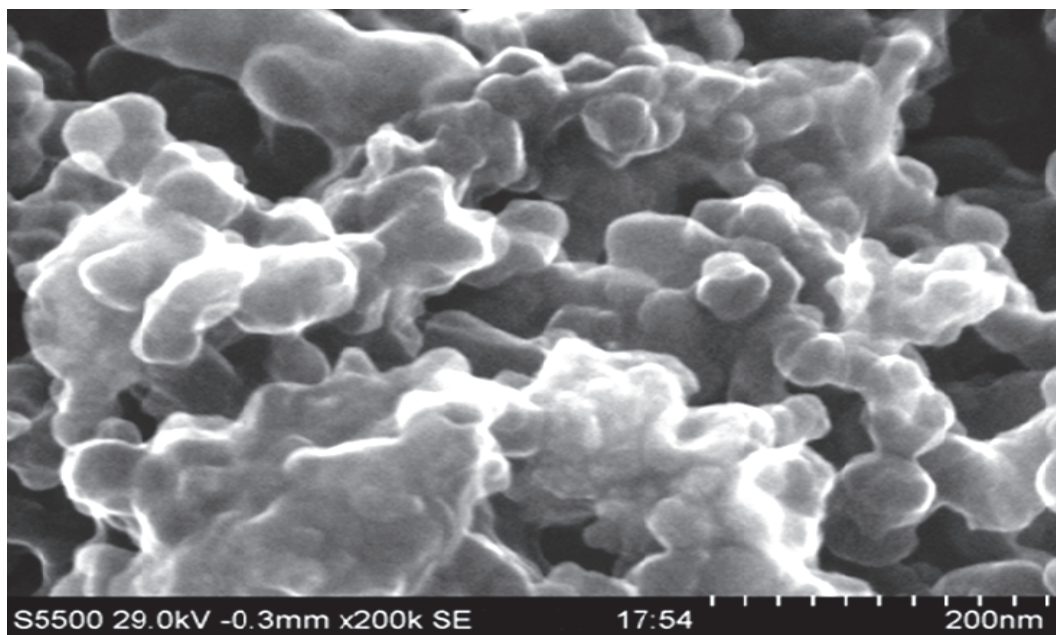
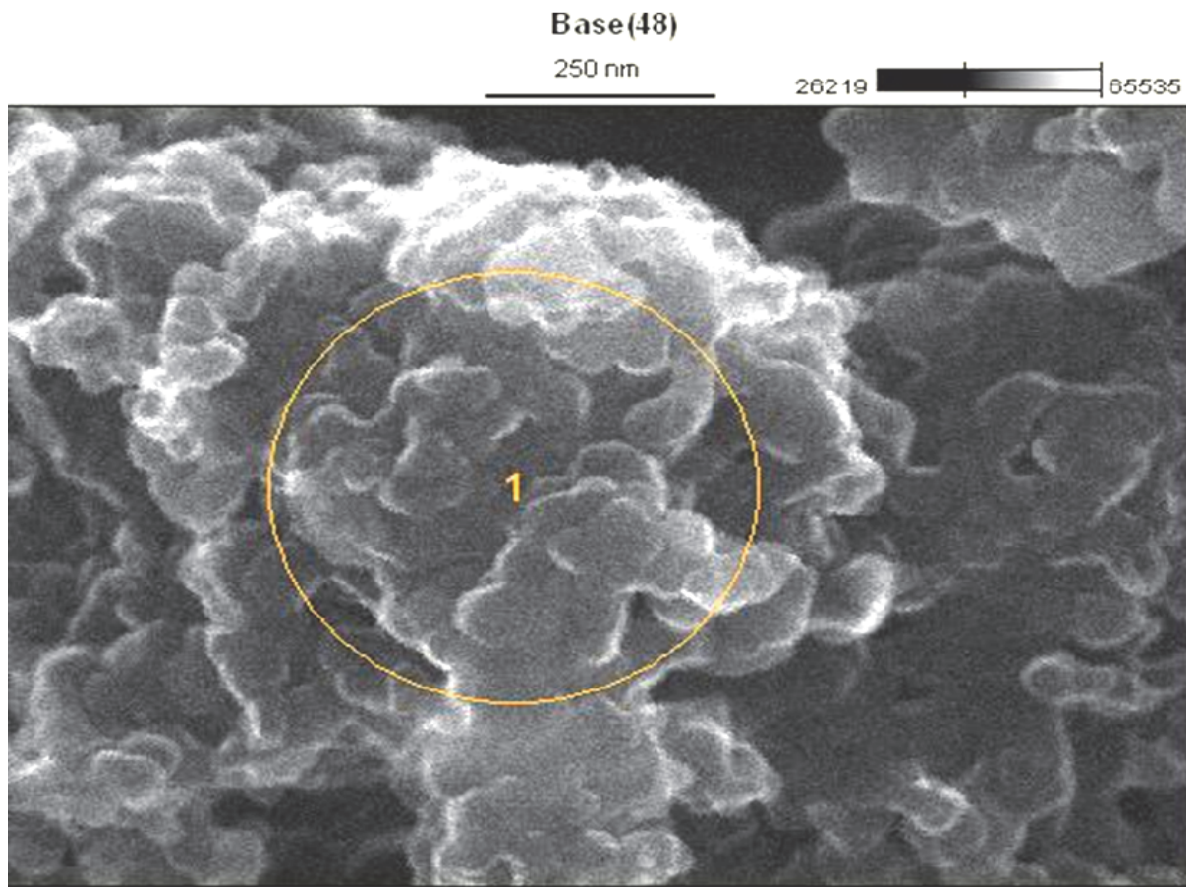


Рис. 6. Электронно-микроскопический снимок частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 25 % от  $Ne_{\text{ном}}$ , увеличение 200 тыс. раз  
Fig. 6. Electronic-microscope snapshot particles of soot marine diesel 6 ChN 24/36 by power 25 % from  $Ne_{\text{ном}}$ , increase 200 thousands once



Element Setup | Analysis Setup | Compare Information | Quant Results | Processing | P&S Select

Tue Jul 07 17:17:01 2015  
 Filter Fit Chi-squared value: 2.035 Errors: +/- 1 Sigma  
 Correction Method: Proza (Phi-Rho-Z)  
 Acc.Voltage: 29.0 kV Take Off Angle: 15.0 deg

Element Line	Element Wt. %	Wt. % Error	Atom %	Atom % Error	Compnd Wt. %
CK	67.52	+/-2.71	75.59	+/- 3.04	67.52
OK	26.78	+/-1.88	22.50	+/- 1.56	26.78
Si K	1.46	+/-0.13	0.70	+/- 0.06	1.46
Si L	...	...	...	...	...
S L	...	...	...	...	...
SK	1.03	+/-0.12	0.43	+/- 0.05	1.03
Fe L	...	...	...	...	...
Fe K	3.21	+/-0.22	0.77	+/- 0.05	3.21
Total	100.00		100.00		100.00

Clear

Рис. 7. Спектральный анализ частиц сажи судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 25 % от  $N_{e_{ном}}$   
 Fig. 7. Spectral analysis particles of soot marine diesel 6 ChN 24/36 by power 25 % from  $N_{e_{ном}}$

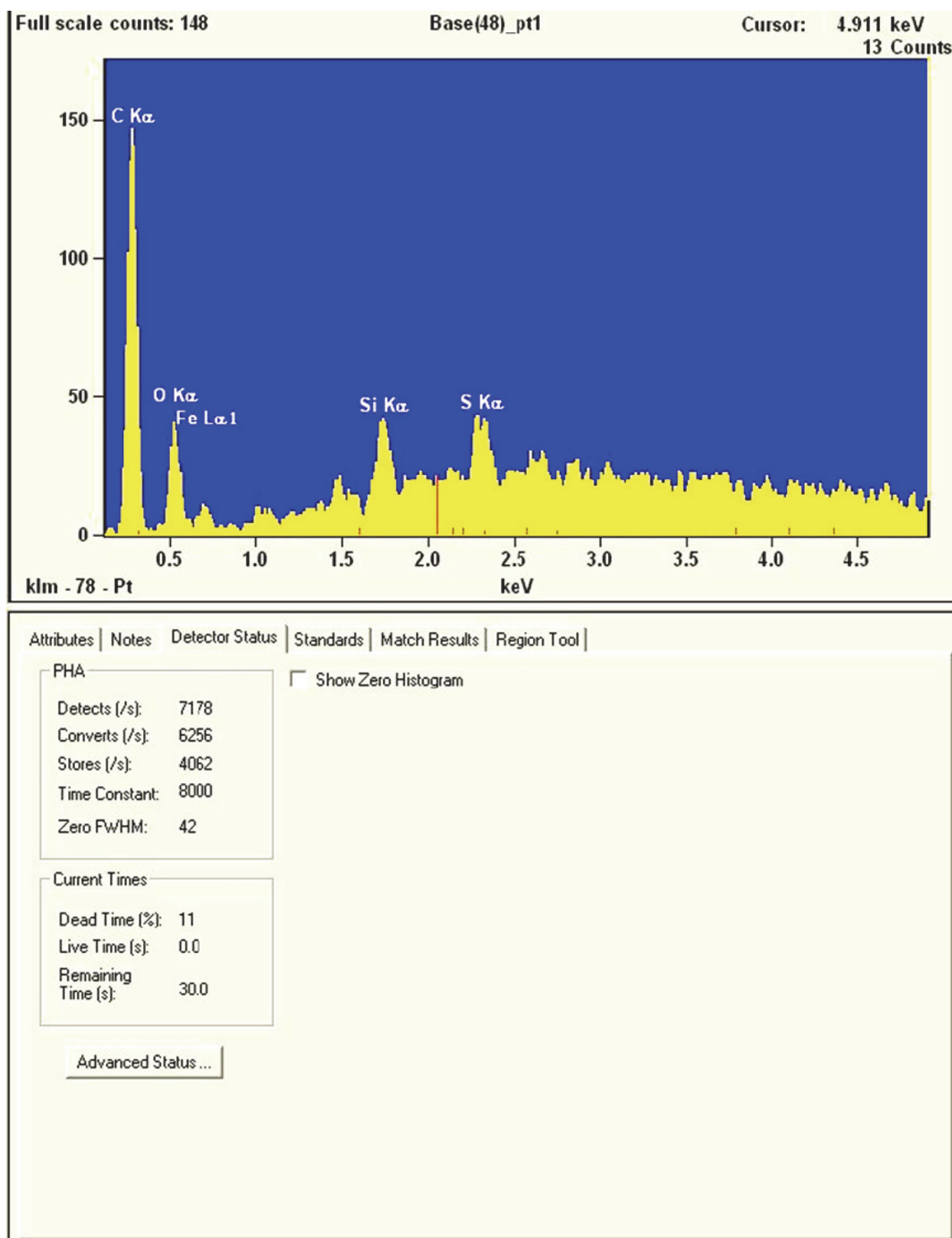


Рис. 8. Гистограмма распределения химических элементов в пробах, отобранных из камеры сгорания судового дизеля 6ЧН 24/36 при нагрузке 25 % от  $N_{e_{ном}}$ .  
Fig. 8. Histogram of dispensation chemical of elements in tests cull from marine diesel combustion chamber 6 ChN 24/36 by power 25 % from  $N_{e_{ном}}$



### **Заключение**

Использование метода осадительной поверхности и разработанного авторами статьи устройства для его реализации позволило получить пробы частиц сажи, взятых непосредственно из камеры сгорания судового дизеля 6ЧН 24/36. Дальнейшая их обработка на сканирующем электронном микроскопе с высокой разрешающей способностью S 5500 Hitachi (Япония) дала возможность определить размеры частиц сажи. Они являются необходимыми параметрами для оценки коэффициента ослабления потока излучения и расчета интегральной степени черноты пламени. Последнее относится к важнейшим входным характеристикам при использовании зонального метода расчета теплообмена излучением применительно к камере сгорания судовых дизелей.

### **Список литературы**

1. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
2. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с.
3. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
4. Бакиров Ф.Г., Захаров В.М., Полещук И.З. и др. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив. М.: Машиностроение, 1989. 128 с.
5. Шейпак А.А. Гидравлика и гидропневмопривод. Ч.1. Основы механики жидкости и газа. М.: МГИУ, 2005. 192 с.
6. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. Владивосток: Дальнаука, 2000. 221 с.
7. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 720 с.
8. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976. 888 с.
9. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 472 с.
10. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Экспериментальное исследование наноструктуры частиц дизельной сажи / Materials International Scientific Conference «European science and technology». Munich, Germany, 2015. P. 343–349.
11. Руднев Б.И., Кудрявый В.Г., Повалихина О.В. Экспериментальное исследование оптических параметров и наноструктур частиц сажи дизельного двигателя // Тепловые процессы в технике. 2016. Т.8, № 9. С. 416–422.
12. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Экспериментальное исследование оптических параметров и наноструктур частиц сажи судового дизеля // Collection of Scientific papers on materials of the International scientific-practical conference «Global science. Development and novelty». Ed. SIC «L Journal». Paris, France, 2016. P. 56–63.

**Сведения об авторах:** Руднев Борис Иванович, доктор технических наук, профессор; Повалихина Ольга Владимировна, доцент, e-mail: [povalichina@mail.ru](mailto:povalichina@mail.ru).